

FORM NO. 51-61  
MAY 1949

CLASSIFICATION SECRET

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY

## INFORMATION REPORT

REPORT NO. [REDACTED]

CD NO.

25X1A

DATE DISTR. 30 August 1949

NO. OF PAGES

NO. OF ENCLS.  
(LISTED BELOW)SUPPLEMENT TO  
REPORT NO.

25X1X

COUNTRY Germany (Russian Zone)

SUBJECT Comparison of Various Regulating Methods  
for High-Voltage Transmission; Governing  
of RectifiersPLACE  
ACQUIRED

25X1C

DATE OF IN  
ACQUIRED

[REDACTED]

25X1A

The attached Rectifier Bureau study on the comparison of various regulating methods for high-voltage transmission and the governing of rectifiers is sent to you for retention in the belief that it may be of interest to you.

[REDACTED]

25X1A

25X1A

[REDACTED]

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ  
Technischer Bericht

H- 143 a

## ВЕРХО СЛЫШНЫХ ТОРОВ

Тема: Vergleich verschiedener Regelmethoden der HGU;  
Thema: Gleichrichterregelung.

Число страниц текста:  
Anzahl der Textblätter: 20

Автор:  
Verfasser:

Число приложений:  
Anzahl der Beilagen: 9

Число фото:  
Anzahl der Fotos: 0

Дата:  
Datum: 18. November 1946

Краткое содержание:  
Kurze Inhaltsangabe:

Die verschiedenen Kenngrößen der Regelstrecke der HGU wie Stellgröße, Regelgröße, Regelaufgabe werden diskutiert und die drei möglichen Regelverfahren, Gleichrichterregelung, Wechselrichterregelung und Doppelregelung aufgezeigt. Für eine Übertragung mit je 6 % Spannungsabfall auf der Gleichrichterseite, dem Kabel und der Wechselrichterseite, werden für den Fall der Gleichrichterregelung die Leistungs- und Aussteuerungsverhältnisse auf der Gleichrichter- und Wechselrichterseite untersucht. Dabei wird die im Bericht H-155 beschriebene vektorielle Betrachtungsweise zu Grunde gelegt. Es werden nur die statischen Probleme erörtert. Die dynamischen Eigenschaften des Regelkreises bei plötzlichen Störungen sowie das Verhalten bei Wechselrichter- und Doppelregelung, seien Gegenstand weiterer Teilberichte.

## II

## 1. Einleitung

1. Einleitung	S. 1
2. Aufgabenstellung	S. 2
3. Aufbau und Regelverhältnisse	S. 4
4. Schaltungsarten der Übertragung	S. 5
5. Leistungs- und Aussteuerungsverhältnisse	
5a. Gleichrichterregelung	S. 6
5b. Gleichrichterregelung	S. 6
5c. Gleichrichterregelung	S. 10
5c1. Gleichrichterregelung mit Mittersteuerung	S. 11
5c2. Gleichrichterregelung mit Leiterschalter	S. 11
5c3. Gleichrichterregelung mit Halbwegsteuerung	S. 12
5c4. Gleichrichterregelung mit Aussetzstromrichter	S. 14
5c5. Serienschaltung von Teilstromrichtern	S. 15
6. Zusammenfassung	S. 15

- III -

Abbildungverzeichnis

- Fig. 1: Vollwert-Kennlinie der Übertragungsleistung
- Fig. 2: Graphische Darstellung der Übertragungsverhältnisse
- Fig. 3: Gleichrichterregelung mit Gittersteuerung
- Fig. 4: DÜSchwinkel der Wechselrichterstation
- Fig. 5: Gleichrichterregelung mit Lastschalter
- Fig. 6: Gleichrichterregelung mit Halbagsteuerung
- Fig. 7: Gleichrichterregelung mit Zusatzstromrichter
- Fig. 8: Schaltung mit Zusatzstromrichter
- Fig. 9: Serienschaltung von Teilstromrichtern
- Fig. 10: Verlauf der Blindleistungen bei den verschiedenen Regelverfahren der Gleichrichterregelung

- IV -

Legende zu Pl. 1.1.10.  
.....

$E_{G0}$	Leerlauf-Gleichspannung bei voller Öffnung
$E_{G0a}$	Leerlauf-Gleichspannung der beiden Halbleiter-
$E_{G0b}$	Dioden bei voller Öffnung
$E_{G1}$	Leerlauf-Gleichspannung: $E_{G1} = E_{G0} \cdot \cos \alpha_1$
$E_G$	Leerlauf-Gleichspannung bei Aussteuerung
$E_{GL}$	Leerlauf-Gleichspannung der Übertragung
$U_{G0}$	Gleichspannung bei Belastung und voller Öffnung
$U_G$	Gleichspannung bei Belastung und Aussteuerung
$\alpha_0$	Stündwinkel
$\alpha_1$	Stündwinkel
$\psi$	Grundwellenverschiebungsfaktor
$\Delta\psi$	Änderungen der Winkel von Leerlauf
$\Delta\alpha_1$	bis auf Vollast
$G_X$	Induktiver Gleichspannungsabfall
$G_K$	Ohmscher Abfall im Kabel und in den Stationen
$N_V$	Nennleistung
$N_{B1}$	Grundwellenblindleistung
$N_{S1}$	Grundwellenscheinleistung

Index I: Gleichrichter  
Index II: Wechselrichter  
Index N: Nennleistung  
Index L: Leerlauf

- 1 -

#### 4. Selbsttätige Regelung

Die selbsttätige Regelung der Überholleistung der Hochstromhochspannungsübertragung kann auf mehreren voneinander abweichenden Prinzipien durchgeführt werden. Eine systematische Untersuchung der verschiedenen Möglichkeiten ist daher erforderlich, in die Bedingungen für den Regler die Regelgröße, Stellgröße, Regelgeschwindigkeit usw. festzulegen.

Der in sich geschlossene Regelkreis einer selbsttätigen Regelung besteht ganz allgemein aus Regelstrecke und Regler. Der Regler hat die Aufgabe, eine vorgeschriebene Beziehung mehrerer Größen der Regelstrecke unabhängig von irgendwelchen Störgrößen aufrecht zu erhalten. Bevor daher über die Ausführung des Reglers irgendwelche Angaben gemacht werden können, muss auf die eigentliche Regelstrecke näher eingegangen und deren statisches und dynamisches Betriebsverhalten betrachtet werden. Die mehr statischen Probleme beziehen sich auf folgende Punkte:

- a) Welche Grösse (Regelgrösse) soll geregelt werden?
- b) Welche Bedingung (Regelaufgabe) soll die Regelgrösse erfüllen?
- c) Auf welche Grösse (Stellgrösse) soll der Regler einwirken?
- d) Beziehung zwischen Regelgrösse und Stellgrösse
- e) Einfluss von langsamen Störungen (Störgrößen) auf die Regelstrecke.

Für das dynamische Verhalten der Regelstrecke sind wesentlich:

- f) Trägheiten der Regelstrecke (Übergangsfunktion vom Stellglied bis zum Messglied)
- g) Einfluss von schnellen Störungen auf die Regelstrecke.

In dem vorliegenden Teilbericht sollen zunächst im wesentlichen die Fragen a., c., die sich mit dem statischen Verhalten der

- 2 -

Regelstrecke b) fassen, behandelt werden. Die Regelstrecke schliesst dabei die Gleichrichterstation, die Überstromübertragung, Leitung und die Wechselrichterstation.

#### 1. Regelgrösse und Regelaufgaben.

.....

Die Gleichstromhochspannungsübertragung ist ihrem Wesen nach nur in der Lage, Wirkleistung zu liefern. Wie bereits in dem Bericht R-10 ausgeführt, wird man aus Gründen der Wirtschaftlichkeit die Übertragung mit konstanter Grundlast fahren. Die Wirkleistung an der Übergabestelle stellt demnach zuckmässigerweise die Regelgrösse dar und die Regelaufgabe besteht darin, den vorgeschriebenen Sollwert der Übergabeleistung einzuhalten. Dieser Sollwert kann konstant sein (Festwertregelung) oder, falls die Wirkleistung der Gleichstromübertragung gegenüber der Netzleistung bereits ins Gewicht fällt, den Belastungsverhältnissen des Netzes angepasst werden. Hierfür bestehen zwei Möglichkeiten:

- a) Der Sollwert der Übergabeleistung wird mit Hilfe eines Fahrplanes auf die gewünschten Werte eingestellt (Fahrplanregelung)
- b) Der Sollwert der Übergabeleistung wird von der Netzfrequenz abhängig gemacht, derart, dass bei absinkender Frequenz der Sollwert bis zu einem oberen Grenzwert ansteigt und bei zunehmender Frequenz bis auf einen unteren Grenzwert absinkt (Kennlinienregelung, s. Fig. 1). Bei Verringerung der Neigung des frequenzabhängigen Teiles geht die Kennlinienregelung in die Festwertregelung über.

Ausser den Wirkleistungsverhältnissen müssen auch die Blindleistungen mit in Betracht gezogen werden. Jede Gitterregelung bedingt bekanntlich einen Blindleistungsbezug aus dem Drehstromnetz. Dies verschlechtert die Spannungshaltung und Stabilität des Netzes und beeinflusst die Wirtschaftlichkeit der Übertragung. Man wird also bestrebt sein, die Aussteuerung

- 3 -

möglichst klein zu halten. Beim Wechselrichter kommt hinzu, dass dort zur Erzielung betriebs sicherer Kommutierungsverhältnisse von der Gefährte bereits bestimmte Mindestforderungen an die Grösse der Aussteuerung gestellt werden. Diese, mit einem Minimum an Blindleistung zu erfüllen, ist eine weitere wesentliche Aufgabe der selbsttätigen Regelung.

Die bisherigen Regelaufgaben heben sich mehr auf den normalen Betrieb der Anlage beschränkt. Darüber hinaus kann der Regler noch eine weitere Funktion übernehmen, die in einem Schutz der Übertragungsanlage bei Betriebsstörungen besteht. Das Eingreifen der Regelung im Katastrophenfall ist beispielsweise erforderlich bei Kurzschlüssen im Sekundärnetz und hierdurch bedingten Spannungsausfällen, um weitestmöglich den Betrieb des Wechselrichters aufrecht zu erhalten und somit gleichstromseitige Kurzschlüsse zu vermeiden.

Zusammenfassend lassen sich also folgende Aufgaben der selbsttätigen Regelung herausstellen:

- a) Regelung der Wirkleistung der Übergabestelle, unabhängig von inneren Störungen der Regelstrecke (z.B. Spannungsschwankungen des Primär- und Sekundärnetzes), auf den vorgegebenen Sollwert.
- b) Regelung der Wirkleistung der Übergabestelle entsprechend den Änderungen des Leistungssollwertes (Äussere Störung), so dass Istwert und Sollwert der Übergabestelle übereinstimmen.
- c) Regelung der Wirkleistung entsprechend a) und b), so dass einerseits der Blindleistungsbedarf ein Minimum wird und andererseits eine ausreichende Betriebssicherheit des Wechselrichters gewährleistet ist.
- d) Eingreifen des Reglers im Katastrophenfall zum Schutz der Übertragungsanlage.

Von obigen 4 Punkten werden in diesem Bericht nur Punkt b) und c) behandelt. Der Einfluss von Spannungsschwankungen und das Verhalten des Reglers im Störfall seien Gegenstand eines weiteren Berichtes.



### 3. Stellrücken und Regelverfahren. Regelung.....

Die Übertragungsleistung ist bei Betrieb mit Netzspannung dem Gleichstrom proportional, dessen Größe durch die Spannungsdifferenz  $U_1 - U_2$  der Gleichrichter- und der Wechselrichterstation dividiert durch den Gesamtwiderstand, gegeben ist. Eine Wirkleistungsregelung ist daher gleichbedeutend mit einer Spannungsregelung. Die Spannungsregelung kann erfolgen:

- a) mit Lastschalter am Haupttr. fo
- b) mittels Gittersteuerung der Hauptgefäße
- c) mittels Lichtstromrichter durch Lastschalter oder Gittersteuerung.

Lastschalter und Gittersteuerung stellen somit die Stellglieder der Regelstrecke dar. Für den Eingriff des Reglers bestehen drei grundsätzliche Möglichkeiten:

- a) Gleichrichterregelung. Die Wirkleistungsregelung erfolgt nur auf der Gleichrichterseite, der Wechselrichter bleibt ungeregelt.
- b) Wechselrichterregelung. Die Wirkleistungsregelung erfolgt nur auf der Wechselrichterseite, der Gleichrichter bleibt ungeregelt.
- c) Doppelregelung. Beide Stationen werden gleichzeitig geregelt. Eine Station wird durch den Wirkleistungsregler beeinflusst, die zweite Station wird durch einen weiteren Regler erfasst, der die günstigsten Bedingungen hinsichtlich Blindleistung und Betriebssicherheit des Wechselrichters schafft.

Die Vor- und Nachteile dieser drei Regelverfahren sollen in dem Bericht E-143 geklärt werden, wobei der vorliegende Teil E-143a sich mit der Methode der Gleichrichterregelung befasst. Bei diesen zunächst mehr grundsätzlichen Überlegungen seien der Einfachheit halber, wie bereits im Abschnitt 2 erwähnt, die Netzspannungen als konstant vorausgesetzt.

# 1. "Technische Daten, bei Bestimmung. .....

Um den tatsächlichen Verhältnissen einigermaßen nahe zu kommen, werden für die Untersuchung der Regelmethode folgende Annahmen gemacht:

Die "Induktiven" Gleichspannungsabfälle des Gleichrichters und Wechselrichters folgen aus der Kurzschlussspannung zu

$$S_x = \frac{u_k}{2}$$

Die Kurzschlussspannung der Haupttransformatoren dürfte bei 10..14% liegen. Die Kurzschlussspannung des Netzes wird, je nach dem Leistungsanteil der HCC-Anlage, 2..6% betragen. Es wird daher für die Gleichrichter- und Wechselrichterstation ein mittlerer Wert von

$$S_{XI} = S_{XII} = 3\%$$

zugrunde gelegt.

Der ohmsche Gleichspannungsabfall in den Stationen von  $S_{XI} \sim S_{XII} \sim 0,4 \dots 0,8\%$ , der durch Kupfer- und Zusatzverluste der Hauptspanner bedingt ist, wird zur Vereinfachung der Untersuchungen zu dem ohmschen Abfall des Kabels geschlagen. Die Gleich- und Wechselrichterspannungen weichen dann um diesen geringen Betrag von dem tatsächlichen Wert ab. Dies ist jedoch für vorliegende Untersuchungen unwesentlich, zumal der Gesamtspannungsabfall derselbe bleibt.

Für den ohmschen Abfall des Kabels ist, je nach den Übertragungsverhältnissen, mit einem Wert von 5..15% zu rechnen. Es sei hier für das Kabel einschliesslich der Trafoverluste und der Glättungsdröseln mit einem Mittelwert von

$$S_K = 8\%$$

gerechnet.

Die Spannungsabfälle seien auf die Wechselrichterlaufspannung bei voller Aussteuerung  $U_{GOII} = 100\%$  bezogen. Der Gesamtspannungsabfall der Übertragung betr. ist dann:

$$\underline{u = u_{GI} + u_{XII} + u_K = 14\%}$$

Die Spannungs-, Leistungs- und Aussteuerungsverhältnisse werden, wie im Bericht N-155 beschrieben, in einem Vektordiagramm dargestellt, wie dies aus Fig. 2 ersichtlich ist.

#### 5. Leistungs- und Aussteuerungsverhältnisse bei Gleichrichterregelung.

##### 51. Wechselrichterstation.

Da nun auf der Gleichrichterseite geregelt werden soll, bleibt der Lückewinkel des Wechselrichters konstant. Mit zunehmender Last steigt die Überlappungsdauer und der Lückewinkel nimmt infolgedessen ab. Bei Übertragungsleistung Null ist der Lückewinkel gleich dem Lückewinkel

$$\alpha_{zII} = \alpha_{II} = \alpha_{II_L}$$

und die Leerlaufspannung der Übertragung

$$U_{GL} = U_{GOII} \cdot \cos \alpha_{zII} = U_{GOI} \cdot \cos \alpha_{zIL}$$

In Fig. 2, in dem vorerst nur der Wechselrichterteil betrachtet werden soll, wurde von einem Lückewinkel  $\alpha_{II_N} = 20^\circ$  bei Nennlast ausgegangen. Bei einem induktiven Gleichspannungsabfall von  $u_{XII} = 8\%$  ergibt sich der zugehörige Lückewinkel zu etwa  $\alpha_{zII} = 39^\circ$ . Der Lückewinkel nimmt also von  $39^\circ$  bis  $20^\circ$

b. Der Verlauf der Leistung von Leerlauf bis auf Vollast gegen den LÖschwinkel ist, nicht dem in Fig. 2 stark gebogene Kurvenbogen  $\alpha_{LII}$ .

Als eine technische bedingte Tatsache eines mit zunehmenden Strom abnehmenden LÖschwinkels widerspricht den physikalischen Gegebenheiten der Entladungsoffense. Die mit steigendem Strom ebenfalls ansteigende Entionisierungszeit verlangt eine Vergrößerung des LÖschwinkels innerhalb gewisser Grenzen oder aber die Einhaltung eines konstanten unteren Grenzwertes, dessen Grösse sich nach den Verhältnissen bei Vollast richtet.

Bei konstanter Aussteuerung des Wechselrichters muss daher der LÖschwinkel so gewählt werden, dass bei der höchsten vorkommenden Last dieser zulässige Wert nicht unterschritten wird und somit eine genügende Betriebssicherheit gewährleistet ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass noch eine gewisse Reserve für kurzzeitige Überlastungen verbleiben muss. Diese Vergrößerung des Zündwinkels ergibt zwangsläufig bei Teillasten einen wesentlich grösseren LÖschwinkel als mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit erforderlich wäre. Dies zeigt auch Fig. 4. Hier ist der Verlauf des LÖschwinkels in Abhängigkeit von der prozentualen Gleichstrombelastung, die bei konstanter Netzespannung praktisch mit der Übergebelastung übereinstimmt, dargestellt. Dabei sind LÖschwinkel von  $\alpha_{LII} = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  bei Nennlast zugrunde gelegt. Ausserdem ist neben dem Gleichspannungsabfall von  $\alpha_{xII} = 8\%$  noch ein extrem niedriger Wert von  $\alpha_{xII} = 3\%$  angenommen worden, um den Einfluss der Kurzschlussspannung zu zeigen. Letzterer Wert kann nur durch eine besondere Wicklungsanordnung der Hauptspanner (z.B. doppelkonzentrische Wicklung) erreicht werden.

Die Schnittpunkte der LÖschwinkelkurven mit der Ordinatenachse ( $N_{wII} / N_{wIIN} = 0$ ) ergeben den Zündwinkel  $\alpha_{zII}$  und mit der Abszissenachse ( $\alpha_{LII} = 0$ ) die Kippgrenze. In Fig. 4 sind die durch das Gefäss vorgeschriebenen unteren Grenz-

- 9 -

weite des LÖschwinkels ebenfalls eingetragenen. Von 0 % bis 150 A Leistung soll der LÖschwinkel von  $5^\circ$  bis auf  $10^\circ$  ansteigen. Eine Vergrößerung des LÖschwinkels über  $20^\circ$  hinaus bringt keine wesentliche Verbesserung der Regelbarkeit mit, da die Entionisierungslast konstante nur  $12^\circ$  beträgt und der LÖschwinkel demnach bereits der zukünftigen Entionisierungsanforderungen entspricht. Der LÖschwinkel sei daher von 150 % der Leistung an mit  $10^\circ$  als konstant angenommen. Die den einzelnen Leistungen (bzw. Strömen) zugeordneten LÖschwinkelpgrenzwerte dürfen nicht unterschritten werden, auch nicht kurzzeitig, da sich die Entionisierungsverhältnisse im Anodenraum momentan den Strömen entsprechend ergeben. Der Stromrichter ist im Wechselrichterbetrieb bei konstanter Aussteuerung also nicht überlastungsfähig, wie beispielsweise eine Maschine, da nicht die Wärmekapazitäten eine Rolle spielen, sondern die physikalischen Größen der Gasentladung, die sich praktisch trägheitslos aus dem jeweiligen Strom herleiten, es sei denn, dass der Wechselrichter im Nennbetrieb nicht voll ausgenutzt wird und eine gewisse LÖschwinkelreserve vorgesehen ist.

Mit aus Fig. 4 zu ersehen ist, liegen bei Teillast die LÖschwinkel, wie bereits erwähnt, zum Teil erheblich über den erforderlichen Werten. Je größer  $G_x$ , umso größer sind die Anforderungen des LÖschwinkels mit der Belastung. Für einen LÖschwinkel von  $10^\circ$  bei Nennstrom wird die Nennleistung nicht mehr erreicht. Bei  $30^\circ$  im Nennbetrieb sind zwar erhebliche Überlastungen möglich, jedoch sind diese auf Kosten höherer Blindleistung erkauft. Die Werte für einen LÖschwinkel von  $20^\circ$  bei Nennstrom dürften den praktischen Verhältnissen am nächsten kommen. Sie enthalten eine Überlastungsreserve von:

$$\begin{aligned} 15 \% & \text{ bei } G_x = 8 \% \\ 25 \% & \text{ bei } G_x = 3 \% \end{aligned}$$

Der Blindleistungsverlauf in Abhängigkeit von der Wirkleistungsabgabe ist ebenfalls aus Fig. 3 ersichtlich. Zu den auf

- 9 -

- 2 -

der Blindleistung auf einem Wirkleistungs- $N_{\text{WII}}$  sind die Abstände die zugehörigen Grundwellenblindleistungen  $N_{\text{BII}}$  aufgetragen, wie dies grundsätzlich im Bericht H-155 Abschnitt 2 beschrieben ist.

Die gesamte Blindleistung  $N_{\text{BII}}$  ist in Fig. 4 eingezeichnet. Es ist ersichtlich, dass die Grundwellenblindleistung mit der Wirkleistung weniger als proportional zunimmt (konvexe Krümmung der Blindleistungs-kurve). Dies ist dadurch bedingt, dass mit zunehmendem Strom die Überlappung ebenfalls zunimmt und somit auch der Grundwellenteilungsfaktor ansteigt. Die sich von Leerlauf bis Vollast ergebenden Änderungen des Verschiebungswinkels, sind in Fig. 3 durch den stark ausgezogenen Kreisbogen  $\Delta\varphi_{\text{II}}$  gekennzeichnet. Neben dem angenommenen Wert von  $\varphi_{\text{WII}} = 8^\circ$  ist in Fig. 3 noch der Blindleistungswinkel  $\varphi_{\text{BII}} = 3^\circ$  eingetragen. Der Blindleistungsbedarf sinkt dadurch um etwa 20 % bei gleicher Wirkleistung. Bei Nennlast betragen die Blindleistungen:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{WII}} &= 8^\circ & \varphi_{\text{LIIIN}} &= 20^\circ & N_{\text{B1II}} &= 60 \% \cdot N_{\text{WII}} \\ \varphi_{\text{BII}} &= 3^\circ & \varphi_{\text{LIIIN}} &= 20^\circ & N_{\text{B1II}} &= 45 \% \cdot N_{\text{WII}} \end{aligned}$$

Um zu zeigen, wie stark sich die bei Teillasten vorhandenen Löschwinkelreserven auf die Blindleistungsanforderung auswirken, ist in Fig. 5 für sonst gleiche Verhältnisse auf der Wechselrichterseite einmal angenommen worden, dass durch entsprechende Massnahmen auf der Gleichrichterseite

- a) der Löschwinkel auf den konstanten Wert von  $20^\circ$  gehalten wird
- b) der Löschwinkel proportional der Übergabeleistung von  $10^\circ$  im Leerlauf auf  $20^\circ$  bei Vollast vergrößert wird.

Dieses Regelverfahren soll in einem weiteren Bericht noch eingehend behandelt werden. Es stellt bezüglich der Blind-

1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 2679, 26

Markierung: 0, abse	Brindl: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100
75 ..	14 .. 18 %
50 ..	13 .. 27 %
25 ..	12 .. 16 %

Bei konstanter Ansteuerung des Hochgleichrichters mit einer Regelung der Wirkleistung der gesamte Spannungsbereich des Gleichrichters, des Kabels und des Hochgleichrichters von der Gleichrichterstation ausgeregt werden. Dies bedingt im vorliegenden Fall eine Änderung der Leerlaufgleichspannung um  $\pm 8 - 24\%$  falls die Übergabelastung zwischen 0 und 100 % geregelt werden soll. In Anlehnung an Fig.3 ergibt sich daher von der Leerlaufspannung

$$E_{\text{III}} = E_{\text{LI}} = E_{\text{LL}}$$

der Übertragung ausgehend für die Leerlaufspannung des Gleichrichters:

$$E_{BOI} = E_{GII} + G_{XII} + C_X + G_{XI}$$

$$E_{\text{TOT}} = 1,24 \cdot E_{\text{SHI}}$$

Die Gleichspannung  $E_{GOI}$  wird damit bedingt durch den Gleichspannungsabfall und die Forderung eines bestimmten Mindestwertes für den Böschwinkel etwas grösser als  $E_{GO-I}$ .

Bei Teilast ist die Blindleistung, die zunächst keine Spannungsänderung erfordert, voll geöffnet. Die Blindleistung ist im allgemeinen Fall, die von der angeforderte Blindleistung ist gleich der Blindleistung, die bei Teilast ist.

$$P_{BI} = P_{BL} = 41\% \cdot N_{WI}$$

Unter dieser Bedingung die Blindleistung bei Teilast hängt davon ab, nach welchem Verfahren die Spannungsregulierung vorgenommen wird.

Die verschiedenen Möglichkeiten der Spannungsregulierung der Gleichrichterstation und die entsprechenden Blindleistungsanforderungen sind in den Diagrammen 3, 5, 6, 7 dargestellt.

#### 521. Gleichrichterregelung mit Gittersteuerung.

Den Blindleistungsbedarf und die Aussteuerungsverhältnisse bei Gitterregelung der Gleichrichterstation, zeigt Fig. 3. Die Ausregelung der gesamten Spannungseffekte bedingt einen Aussteuerbereich von  $\alpha_{ZI} = 39^\circ$  im Leerlauf bis auf  $\alpha_{ZI} = 0^\circ$  bei Nennlast. Dies bringt auch auf der Gleichrichterseite bei Teillasten verhältnismäßig hohe Blindleistungen mit sich. Der Grundwellenleistungsfaktor ändert sich dabei von  $\cos \varphi_I = 0,77$  im Leerlauf bis auf  $\cos \varphi_I = 0,92$  bei Vollast. Die Änderungen des Zündwinkels ( $\Delta \alpha_{ZI}$ ) und des Verschiebungsfaktors ( $\Delta \varphi_I$ ) beim Überstreichen des gesamten Lastbereiches, sind in Fig. 3 wieder stark ausgezogen.

Auf der Gleichrichterseite ist, ebenso wie auf der Wechselrichterseite, die Blindleistungskurve konvex gekrümmt, bedingt durch die Zunahme des  $\cos \varphi_I$  mit steigender Last.

#### 522. Gleichrichterregelung mit Lastschalter.

Erfolgt die Spannungsänderung auf der Gleichrichterseite



nicht erfüllt. Der Blindleistungsbedarf ist dann durch den Blindleistungsschalter der Leitung,  $P_{BI}$ , zu führen. Dieser Blindleistungsbedarf ist auch bei Blindleistungsschalter voll geöffnet. Der Blindleistungsbedarf ist dann auch bei Blindleistungsschalter voll geöffnet. Die Kommutierung Blindleistung beschränkt.

In Fig. 5 ist die Blindleistung  $P_{BI}$  und die Ortskurve der  $\varphi_I$ -Pfeile bei verschiedenen Transformatorverhältnissen, d.h. verschiedenen Gleichspannungen  $U_{GDI}$  und Blindleistung eingetragen unter der Annahme unendlich großer Blindleistung des Lastschalters. Infolge zunehmender Übertragungsfähigkeit der  $\cos \varphi_I$  mit steigendem Lastab. Die Blindleistungskurve ist daher konkav. Die Blindleistungsstelle ist gegeben durch die bei ausschließlicher Gitterregelung. Die Blindleistungskurve ist hervor, wo der Blindleistungsbedarf bei Lastabnahme noch gestrichelt eingetragen ist. Es ergeben sich Blindleistungen bis zu 50 %.

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit bezüglich Blindleistungsbedarf ist durch die Ortskurven der  $\varphi_I$ -Pfeile gegeben. Bei ausschließlicher Gitterregelung verlaufen diese auf einem Kreisbogen (s. Fig. 5). Parallele Geraden durch diesen Kreisbogen ergeben mit den  $\varphi_I$ -Ortskurven Schnittpunkte für die prozentuale Wirkleistung. Der horizontale Abstand  $x_1, x_2$  dieser Punkte ist somit ein prozentuales Maß für die erzielte Blindleistungseinsparung. Die Winkeldifferenz  $\Delta \varphi_I$  der beiden Pfeile ergibt die Änderung des Verschiebungsfaktors.

### 523. Gleichrichterregelung mit Halbbrücksteuerung.

Bei der Brückenschaltung besteht die Möglichkeit, beide Brückenhälften unabhängig voneinander zu regeln, insbesondere eine Brückenhälfte voll zu öffnen und die Spannungsregelung mit der anderen Brückenhälfte vorzunehmen. Es tritt da nur die Steuerblindleistung einer Brückenhälfte in Erscheinung, die kleiner ist als bei der Regelung der gesamten Brücke auf denselben Spannungswert, zusätzlich der Kommuti-

- 13 -

25X1A

angablenleistung der gesteuerten und ungesteuerten Brückenhälften. Dies geht im einzelnen näher aus Fig. 6a hervor. Die gesamte Spannung  $E_{GOI}$  ergibt sich als Summe der Brückenteilschaltungen  $E_{GOa} + E_{GOb}$  der Brückenhälften a und b, die nunmehr die Radian der beiden Aussteuerungskreise darstellen. Spannungen, Blindleistungen, Zünd- und Verschiebungswinkel ergeben sich wie zuvor nur, dass jeweils die Summe aus den Werten für jede Brückenhälfte zu bilden ist. Im Leerlauf ist die Teilschaltung  $E_{Gb}$  soweit herunter geregelt, dass

$$E_{GOa} + E_{Gb} = E_{GI} = E_{GII} = E_{GL}$$

wird.  $\varphi_b$  ist dann gleich Null, der Zündwinkel und Verschiebungswinkel

$$\varphi_b = \alpha_{zb} = \alpha_{zbL}$$

Der resultierende Leistungsfaktor ist  $\varphi = \varphi_L$ . Zur Vergrößerung der Übertragungsleistung regelt man die Brückenhälfte b durch Verringerung des Zündwinkels hoch. In Fig. 6b sind die entsprechenden Werte für 50 % der Übertragungsleistung eingetragen. Der Grundwellenleistungsfaktor von a nimmt dann entsprechend der Überlappung ab ( $\Delta f_a$ ). Zündwinkel und Leistungsfaktor ändern sich um  $\Delta \alpha_{zb}$  und  $\Delta \varphi_b$ . Der resultierende  $\varphi$ -Wert  $\varphi = \varphi_a + \varphi_b$  wandert auf der gestrichelt eingetragenen Ortskurve.

In Fig. 6b sind die Blindleistungen und Phasenwinkelortskurven für Regelung zwischen Leerlauf und Vollast eingetragen. Gegenüber der Gitterregelung beider Brückenhälften (Vollwegsteuerung) bringt die Halbwegsteuerung nur eine unwesentliche Verbesserung des Leistungsfaktors mit sich, wie insbesondere aus den nur geringen Unterschieden der  $\varphi_I$ -Ortskurven hervorgeht. Ausserdem ist zu beachten, dass durch die Art dieser Steuerung der sechphasige Charakter der Brückenschaltung teilweise verloren geht und mit zunehmender Unsymmetrie der Aussteuerungen sowohl gleichstromseitig als auch auf der Netz-

ante, die die Leistung des Hauptspanners  
welle stärker in Anspruch nehmen.

#### 5.2.4. Gleichrichterregler mit Zusatzstromrichter.

Das Vorstehend erwähnte Prinzip der Teillaststeuerung kann auch derart abgewandelt werden, dass sämtliche Hauptkreisläufe voll angesteuert werden und die Spannungsregelung durch einen Zusatzstromrichter vorgenommen wird. Der Zusatzstromrichter kann nach Fig. 8 in die Mitte gelegt und der Umspannersternpunkt geerdet werden. Die Leistungsregelung von Null bis Vollast wird durch Hochregeln des Zusatzstromrichters bis auf volle Spannung mittels der Gittersteuerung vorgenommen. Den Verlauf der Blindleistung zeigt Fig. 7. Dabei ist angenommen, dass im Leerlauf der Zusatzstromrichter a) in den Wechselrichterbereich angesteuert ist, b) auf Gleichspannung Null geregelt ist. Der Blindleistungsverbrauch ist in beiden Fällen praktisch derselbe.

Neben der Gitterregelung ist auch eine Regelung durch Lastschalter im Umspannersternpunkt möglich. Dies ist insofern gegenüber der Regelung der Hauptspanner vorteilhaft, als der Sternpunkt und somit auch der Lastschalter auf Erdpotential liegen und ausserdem nur ein Lastschalter für beide Hälften benötigt wird, hat allerdings den Nachteil, dass keine direkte Erdung auf der Gleichstromseite möglich ist. Bezüglich der Blindleistung ergeben sich dieselben Verhältnisse wie bei der Regelung der Hauptspanner, da bei Voraussetzung gleicher Spannungsabfälle die Kommutierungsblindleistungen dieselben sind.

Im Vergleich zu den anderen Verfahren liegt der Blindleistungsverbrauch bei Verwendung eines Zusatzgleichrichters zwischen der Halbwegsteuerung und der Regelung mit Lastschaltern. Ein wesentlicher Nachteil der Gleichrichterregelung mit Zusatzstromrichter ist der apparative Aufwand. Die Gleichstromleistung beträgt beim Zusatzgleich- Wechselrichter rund 12 % und beim Zusatzgleichrichter rund 24 % der ge-

samten Aborts, und die für beiden Anlagenhälften bei einem Gesamtspannungsabfall von 24 %.

#### 525. Serienschaltung von Teilstromrichtern.

Bisher war eine Schaltung mit je einer dreiphasigen Brücke für jede Anlagenhälfte zugrunde gelegt. Eine andere Möglichkeit ist die Serienschaltung von Teilstromrichtern, wie sie in Fig. 9 für zwei Teilstromrichter je Anlagenhälfte dargestellt ist. Es würde im vorliegenden Fall bei Zugrundelegung eines Gesamtspannungsabfalls von 24 % genügen, auf jede Anlagenhälfte eine Brückenhälfte nach dem Prinzip der Halbwegsteuerung zu regeln. Es tritt dann nur die Steuerblindleistung dieser Brückenhälfte in Erscheinung, die kleiner ist als im Fall 523 (Fig. 6) bei Halbwegsteuerung mit nur einer einzigen Brückenschaltung je Anlagenhälfte. Es ergeben sich blindleistungsmässig dieselben Verhältnisse wie in Fig. 7b für den Zusatzgleichrichter dargestellt ist. Der gesamte apparative Aufwand ist jedoch bei Verwendung einer Brückenhälfte eines Teilstromrichters zur Ausregelung des Spannungsabfalls wesentlich geringer als bei Anordnung eines Zusatzstromrichters mit einer dem Spannungsabfall entsprechenden Nennleistung.

#### 6. Zusammenfassung.

Abschliessend lässt sich sagen, dass die Regelung der Übertragungsleistung auf der Gleichrichterseite für den Wechselrichter ungünstige Verhältnisse liefert, die es nicht gestatten, dort mit den optimalen Bedingungen bezüglich Betriebssicherheit der Kommutierung und minimale Blindleistung zu arbeiten. Auf der Gleichrichterseite ergeben sich je nach dem zur Anwendung kommenden Prinzip der Spannungsregelung verschiedene Blindleistungen bei Teillast. Die Blindleistungskurven sind in Fig. 10 der Übersichtlichkeit halber nochmals zusammengestellt. Die grössten Blindleistungen liegen bei der

- 16 -

25X1A

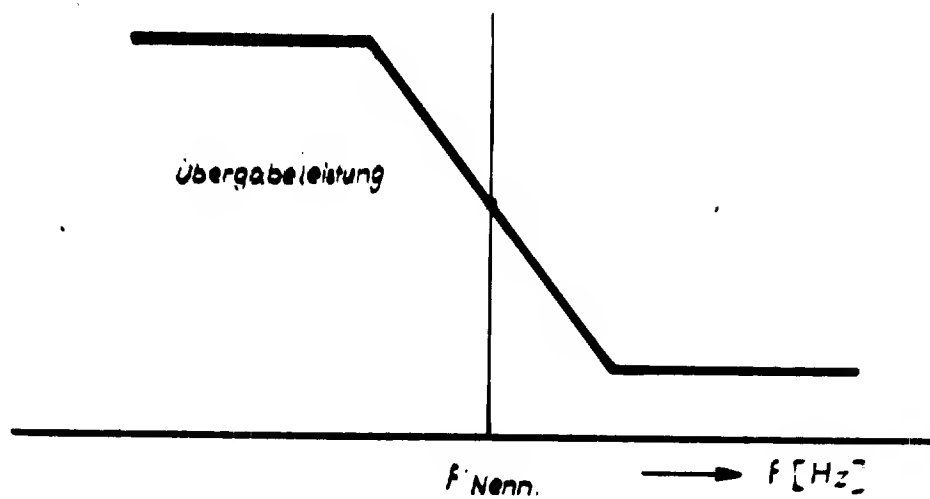
Gitterregelung (Kurve a) und die kleinster Blindleistung mit Lastschaltern (Kurve d) vor. In beiden Fällen liegen die Verfahren, die aus einer unterschiedlichen Verteilung von Gleichrichterstationen bestehen (Kurven b, c, e). Es dürfte sich, dass auf der Gleichrichterseite den Blindleistungsfragen nicht die Bedeutung zukommt wie bei Gleichstrom auf der Wechselrichterseite, da hier meist ein grosses Kraftwerk in unmittelbarer Nähe liegt, so erscheint ein grösserer Aufwand zur Verringerung der Blindleistung bei Teillasten der Gleichrichterstation nicht gerechtfertigt.

Ganz allgemein lässt sich noch feststellen, dass die Regelung mit Lastschalter zwar den Vorteil kleinster Blindleistung, aber den Nachteil einer durch die zu bewegenden Massen bedingten Trägheit aufweist, während die Gitterregelung praktisch trägheitslos arbeitet, aber mit einem erhöhten Blindleistungsbedarf verbunden ist. Die günstigste Lösung dürfte in einer Kompensation beider Verfahren bestehen, derart, dass die Gittersteuerung eine schnelle Ausregelung vornimmt und durch Betätigung der Lastschalter die Aussteuerung und damit die Blindleistung immer auf einen kleinstmöglichen Wert zurückgeholt wird. Hierauf wird bei der Untersuchung der Netzspannungsschwankungen in einem der folgenden Berichte noch näher eingegangen werden.

---

E n d e !

3B-H-143a



**Fig.1 Sollwert - Kennlinie der Übergabeleistung**

25X1A



3B-H-143a

25X1A

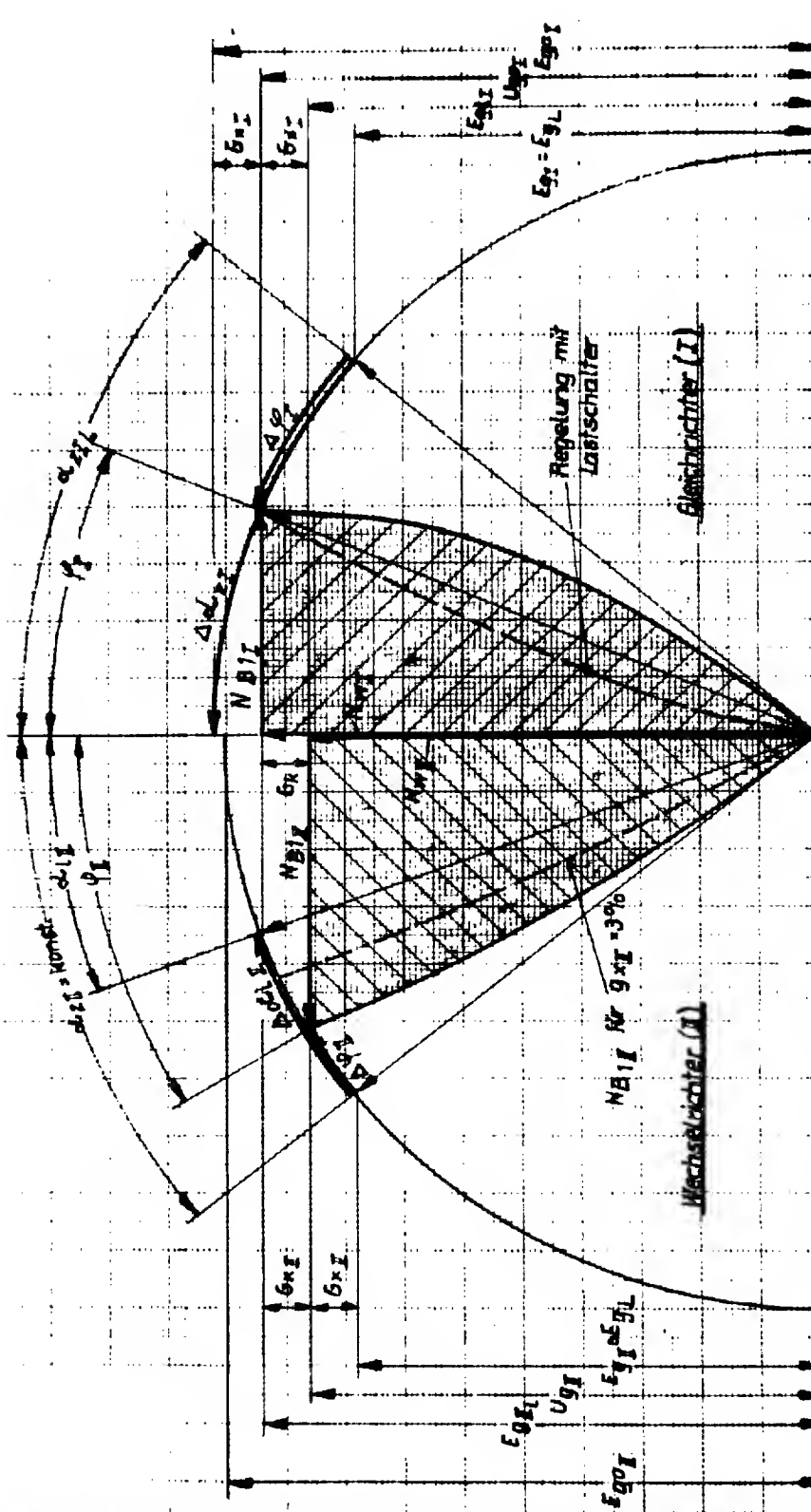


Fig.3 Gleichrichterregelung mit Gittersteuerung.

Wechselrichter unregelmäßig,  $\alpha_{1I} = 39^\circ = \text{konst.}$

$\alpha_{1I} = 20^\circ$  bei Normstrom,  $\alpha_{2I} = 64^\circ = 8\% \cdot \alpha_{1I}$



JB-H-143a

25X1A

# Fig. 4 Löschwinkel der Wechselrichter-Station

abhängig von der Wirkleistung für

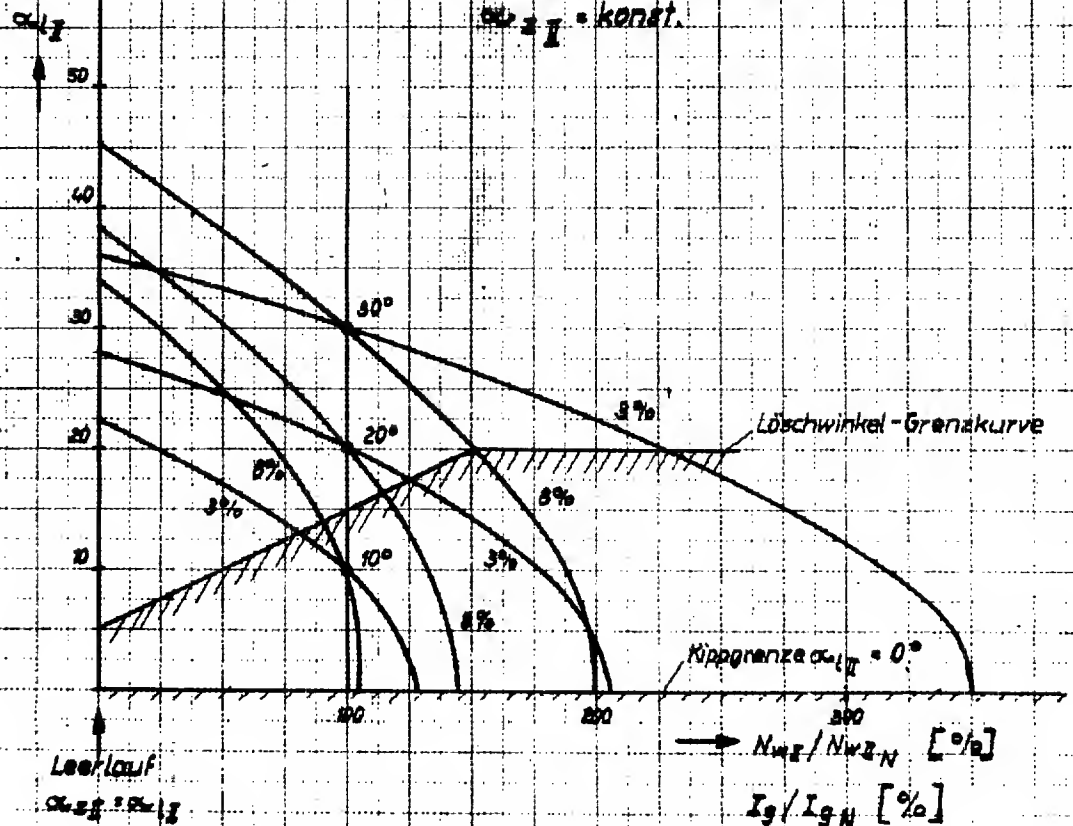
$$g_{xI} = 3\%, g_{xII} = 6\%$$

$\alpha_{LI} = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  im Nennbetrieb

Gleichrichterregelung

Wechselrichteraussteuerung konstant

$$\alpha_{LI} = \text{konst.}$$



78-H-143a

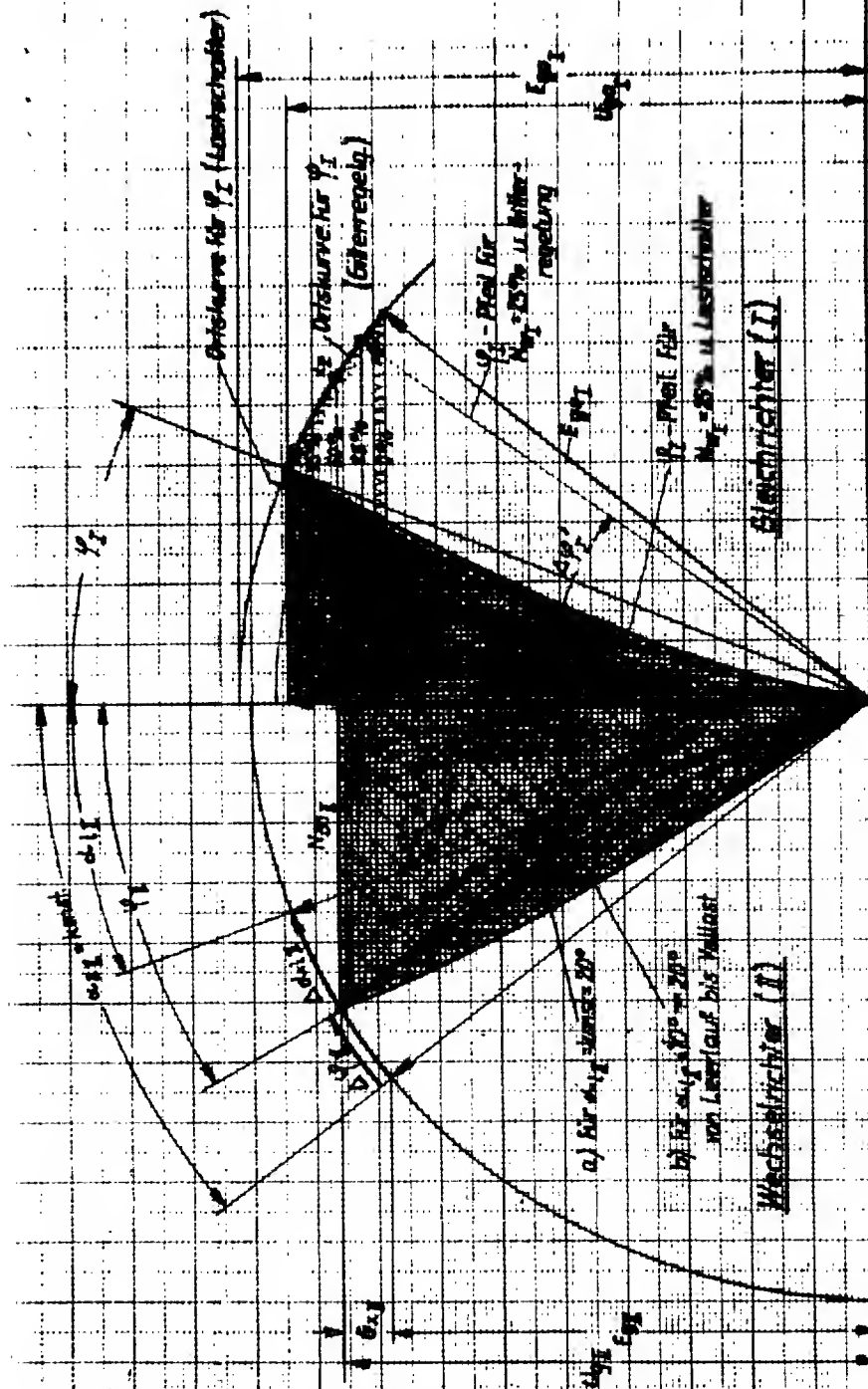


Fig.5 Gleichrichter-Regelung mit Lastschalter

Wechselrichter ungerichtet,  $\alpha_{1,2} = 30^\circ$  konst.

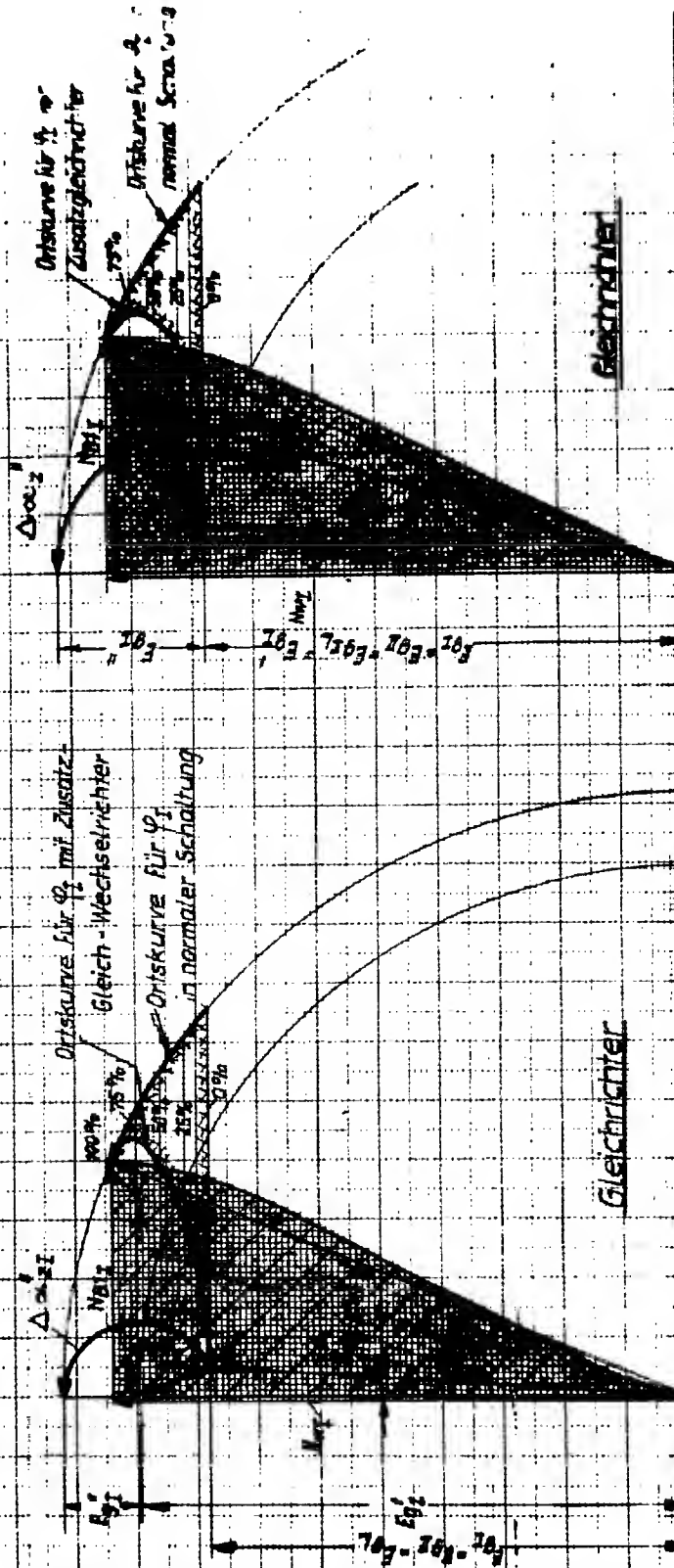
$\alpha_{1,2} = 2$  bei Normstrom,  $\delta_{1,2} = \delta_{1,2} = 0$ ,  $\gamma_{1,2} = 0$



wechselseitig ungerneht

Oct. 1 = 20° bei Nennstrom,  $\alpha_1 = \theta_1 \cdot I = \theta_k = 0.96 \text{ Eos}$

JB-H-143a



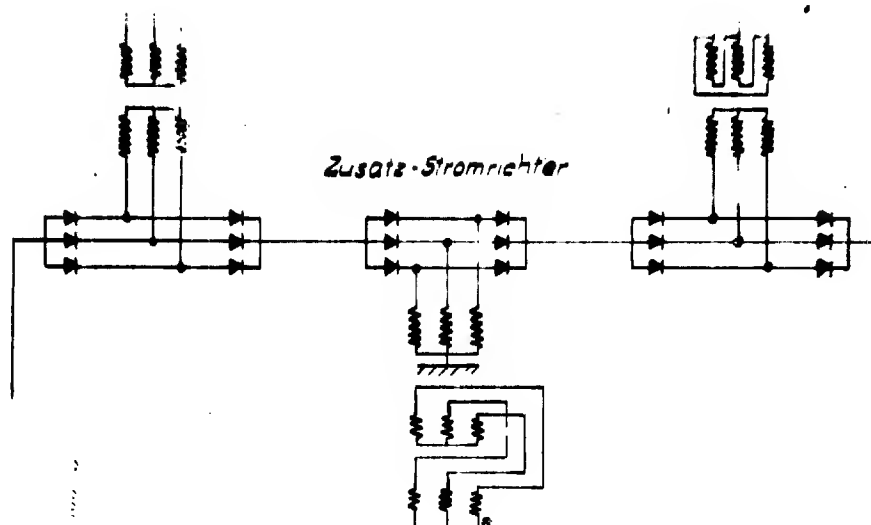
a) Zusatz-Gleich- u. Wechselrichter

## Fig. 7 Gleichrichterregelung mit Zusatzstromrichter

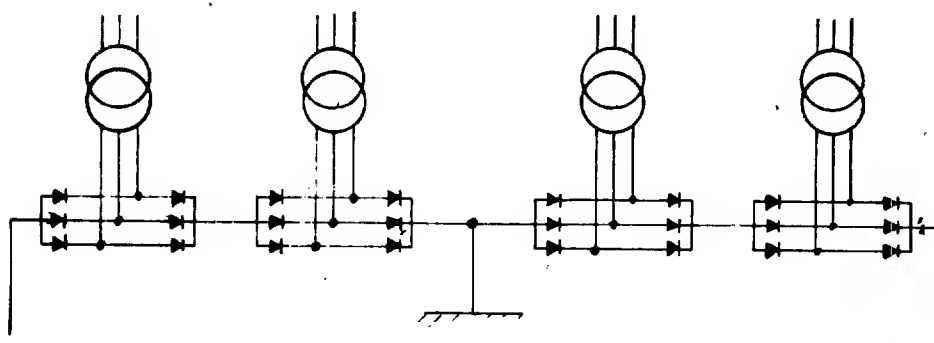
Hauptgleichrichter und Hauptwechselrichter unregelt

$\alpha_{d1} = 20^\circ$  bei Nenn. vom  $G_{K1} = G_{K2} \cdot G_{K3} = 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.9$

b) Zusatz-Gleichrichter



**Fig.8** Schaltung mit Zusatzstromrichter



**Fig.9** Serienschaltung von Teilstromrichtern

38-H-143a

25X1A

**Fig.10 Verlauf der Blindleistungen bei den verschiedenen Regelverfahren der Gleichrichterregelung.**

$$g_{xI} \cdot g_{xI} \cdot g_K = 8\%$$

- a. Gitterregelung (Vollweg)
- b. Halbwegsteuerung
- c. Zusatzgleichrichter, Halbwegsteuerung bei Serienschaltung von Teilstromrichter
- d. Zusatz-Gleich- u. Wechselrichter
- e. Regelung mit Lastschalter

